ИНФОРМАТИКА
2012 январь-март № 1

УДК 004.056

А.И. Демидчук, Ю.А. Чернявский

АЛГОРИТМ ПОИСКА В ИЗОБРАЖЕНИЯХ СКРЫТЫХ ДАННЫХ, ВСТРОЕННЫХ МЕТОДОМ КОХА – ЖАО

Дается краткое описание метода стеганографического сокрытия данных Коха – Жао. Описывается алгоритм анализа изображений формата JPEG для установления факта скрытой передачи данных и приводятся результаты применения к тестовому набору изображений.

Введение

Цифровая стеганография объединяет методы скрытой передачи данных в объектах цифрового вида. Чаще всего в качестве так называемых стеганографических контейнеров используются цифровые данные, содержащие некоторую избыточность информации: изображения, аудио- и видеоданные, хотя также может использоваться обычный текст, файлы и т. д. [1]. При формировании цифровой подписи для объектов интеллектуальной собственности незначительный объем данных встраивается так, чтобы информация сохранялась при различных модификациях объекта. Методы стеганографии могут применяться и для скрытого копирования секретных данных, а также в средствах коммуникации преступных и террористических формирований.

Данная работа посвящена описанию критериев оценки JPEG-изображений на предмет наличия в них скрытой информации, внедренной методом Коха – Жао.

1. Метод встраивания Коха – Жао

Жао Цянь и Экхард Кох предложили выполнять встраивание скрываемого сообщения в процессе JPEG-сжатия [2, 3], как показано на рис. 1.

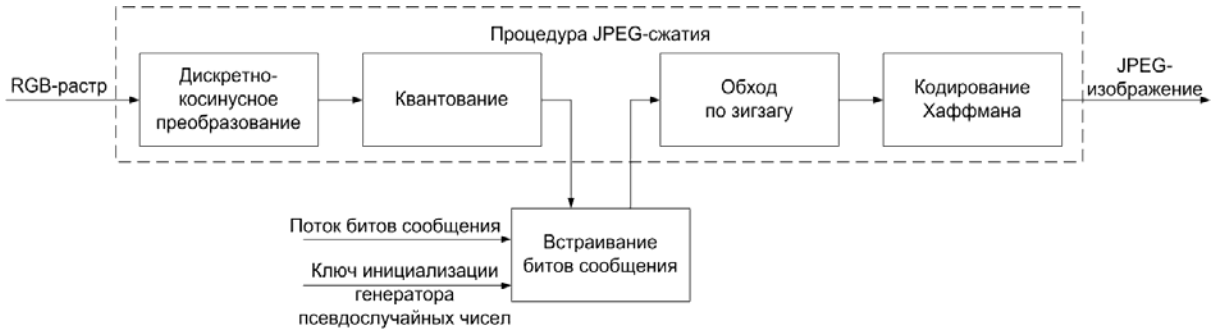


Рис. 1. Встраивание битов сообщения в процессе JPEG-сжатия изображения

На первом этапе выполняется базовая процедура сжатия изображения в JPEG, которая состоит из дискретно-косинусного преобразования (ДКП) блоков пикселов размерностью 8×8 и операции квантования. Затем в полученные блоки коэффициентов выполняется встраивание битов скрываемого сообщения и завершается процедура сжатия JPEG.

В методе Коха – Жао для встраивания используются квантованные коэффициенты ДКП, соответствующие области средних частот. Введем следующие обозначения: ci – i-й бит встраиваемого сообщения, b – блок фрагмента изображения 8×8 пикселов, B – последовательность блоков b, выбранных псевдослучайным образом.

Алгоритм записи (встраивания) данных:

1. Если $i \geq n$, где n – количество битов сообщения, то выход.
2. Выбирается блок b с использованием генератора псевдослучайных чисел.
3. Если b находится в B, то переход к шагу 2; в противном случае добавляется b к B.

4. Вызывается функция *check_write(b, ci)* для проверки блока на соответствие критериям допустимости встраивания: если функция возвращает FALSE (т. е. блок не удовлетворяет выдвинутым условиям), то переход к шагу 2.

5. Вызов функции *write(b, ci)* для встраивания бита *ci* в блок *b*.

6. Увеличение *i*, переход к шагу 1.

Номера элементов блока *b*, которые соответствуют области средних частот и для которых вычисляются коэффициенты ДКП, представлены на рис. 2. Здесь *k* и *l* – индексы элементов блока *b* по вертикали и горизонтали соответственно, для которых измеряются коэффициенты ДКП. Эти индексы изменяются в диапазоне [0, 7] для случаев сжатого изображения.

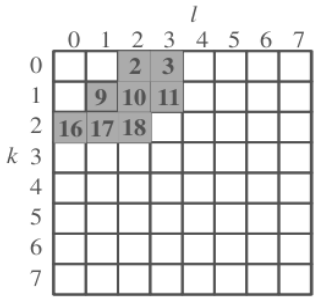


Рис. 2. Область встраивания

Обозначим $m \in \{2, 3, 9, 10, 11, 16, 17, 18\}$ индекс коэффициента в области средних частот (выделена серым цветом на рис. 2), которая предложена для встраивания битов сообщения. Бит секретного сообщения встраивается путем модификации отношений трех квантованных коэффициентов в каждом подходящем блоке. Отношения между выбранными коэффициентами делятся на три группы (рис. 3), представляющие закодированные '0', '1' и недействительные комбинации.

(k_1, l_1)	(k_2, l_2)	(k_3, l_3)	
H	*M*	*L*	Представление '1'
M	*H*	*L*	
H	*H*	*L*	
M	*L*	*H*	Представление '0'
L	*M*	*H*	
L	*L*	*H*	
H	*L*	*M*	Недопустимое представление
L	*H*	*M*	
M	*M*	*M*	

Рис. 3. Кодирование отношений трех коэффициентов, выбранных псевдослучайно из области встраивания

Символы *H*, *M*, *L* обозначают соответственно большее, среднее и меньшее значения коэффициента.

Алгоритм проверки допустимости использования блока b для записи бита ci при реализации функции check_write (b, ci):

1. С использованием заранее заданного ключа псевдослучайным образом выполняется выбор трех позиций элементов для блока *b* по ранее заданной таблице позиций. Они именуются m_1, m_2 и m_3.

2. К блоку *b* применяется ДКП и квантование с показателем качества сжатия *Q*. Параметрами $YQ(m_1)$, $YQ(m_2)$, $YQ(m_3)$ обозначим квантованные коэффициенты в указанных позициях.

3. При встраивании бита $ci = 1$ проверяем условие: если $\text{MIN}(|YQ(m_1)|, |YQ(m_2)|) + D < |YQ(m_3)|$ (где $|YQ(m_u)|$ – абсолютное значение коэффициента $YQ(m_u)$ при $u \in 1...3$, MIN –

минимальное значение из двух величин, D – пороговое значение разности между выбранными коэффициентами), то блок b помечается как недопустимый:

– блок b модифицируется в соответствии со значениями для недопустимых комбинаций (рис. 3);

– выполняется операция, обратная квантованию, и обратное ДКП;

– возвращается значение FALSE.

4. При встраивании бита $ci = 0$ проверяем условие: если $\mathrm{MAX}(|YQ(m_1)|, |YQ(m_2)|) > |YQ(m_3)| + D$ (где MAX – максимальная величина из двух значений), то блок b помечается как недопустимый:

– блок b модифицируется в соответствии со значениями для недопустимых комбинаций (рис. 3);

– выполняется операция, обратная квантованию, и обратное ДКП;

– возвращается значение FALSE.

5. В противном случае возвращается TRUE.

2. Метод анализа

Данный метод основан на расчете среднеквадратичного отклонения (СКО) блока ДКП коэффициентов и анализе гистограммы распределения коэффициентов СКО для блоков изображения.

Анализ изображения можно разделить на следующие этапы:

– получение квантованных коэффициентов ДКП;

– проверка случая встраивания с пороговым значением $D > 1$;

– проверка случая встраивания с пороговым значением $D = 1$.

3. Получение квантованных коэффициентов ДКП

На первом этапе анализа изображение *Im* декодируется по алгоритму JPEG и формируется множество квантованных коэффициентов для каждого из компонентов Im(Col) блоков изображения $b_{8\times8}$, где $\mathrm{Col} \in \{Y, Cb, Cr\}$ – компонент цвета или яркости. Далее из каждого блока множества $B_{8\times8}$ выбирается по восемь коэффициентов и формируется множество блоков $B_8 = B_{8\times8}(m)$ при $m \in \{2, 3, 9, 10, 11, 16, 17, 18\}$ (см. рис. 2), в которые согласно описанию метода допустимо встраивание бита информации [2, 3].

4. Проверка случая встраивания с пороговым значением $D > 1$

К каждому блоку b_8 из множества B_8 применяется операция вычисления СКО:

$$s = \sqrt{\frac{1}{z-1}\sum_{j=1}^{z}\left(x_j - \bar{x}\right)^2}, \qquad (1)$$

где $z = 8$ – количество выбранных согласно алгоритму встраивания коэффициентов ДКП; x_j – j-й коэффициент; $\bar{x}$ – среднее значение коэффициента в анализируемой группе.

Для всех блоков B_8 целого изображения вычисляются СКО и формируется массив коэффициентов среднеквадратичных отклонений S. Затем на основе полученного множества коэффициентов определяются гистограммы распределения среднеквадратичных отклонений для коэффициентов больше нуля $H_{STD}(S)$, $S > 0$. В случае учета нулевых коэффициентов максимум гистограммы будет располагаться в точке 0, так как в рассматриваемых позициях многих блоков ДКП располагаются нулевые значения коэффициентов. Такие блоки согласно алгоритму не участвуют во встраивании битов сообщения.

На рис. 4 приведены примеры гистограмм распределения коэффициентов СКО для пустых изображений и изображений, содержащих скрытую информацию (стегоизображений), при встраивании сообщения по методу Коха – Жао с порогом $D \in \{1, 2, 3\}$.

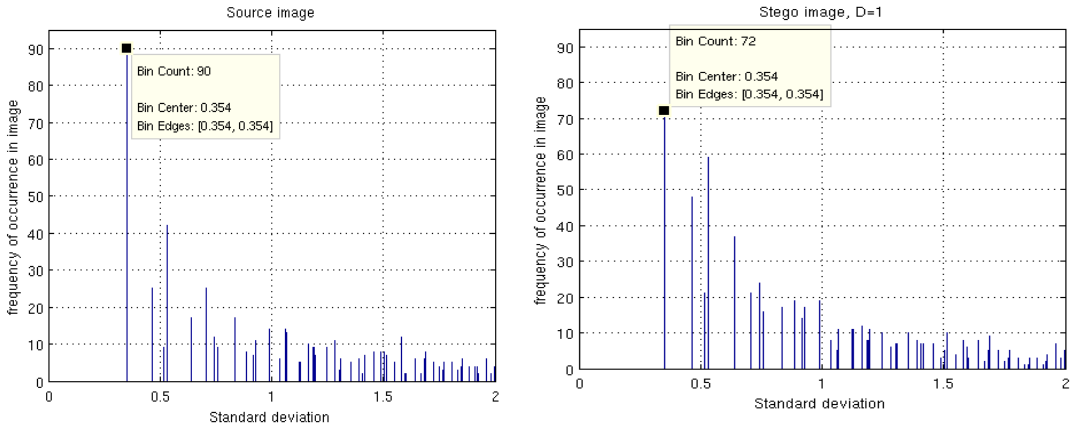
Далее по гистограмме находится максимум, т. е. находится значение СКО, которое чаще всего встречается:

$$s_{max} = \arg\max_{s}\left[H_{STD}(s)\right]. \quad (2)$$

Максимальное значение СКО сравнивается с пороговым значением ς:

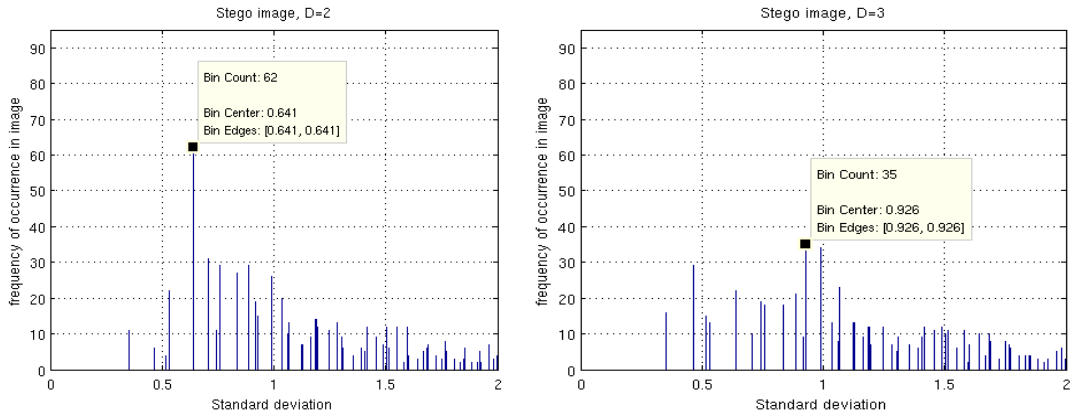
$$s_{max} \le \varsigma \Rightarrow Im(Col) \notin \{\text{STEGO}\};$$
$$s_{max} > \varsigma \Rightarrow Im(Col) \in \{\text{STEGO}\}.$$

Если $s_{max} > \varsigma$, то анализируемый компонент изображения содержит скрытую информацию, в противном случае это обычное изображение.



а)

б)



в)

г)

Рис. 4. Гистограммы распределения коэффициентов СКО:
а) исходное изображение; *б)* контейнер заполнен с порогом $D = 1$;
в) контейнер заполнен с порогом $D = 2$; *г)* контейнер заполнен с порогом $D = 3$

В результате экспериментальных исследований, проведенных более чем для 400 изображений при различных пороговых значениях D и с разной плотностью заполнения контейнера, определено оптимальное пороговое значение $\varsigma = 0{,}354$.

При проведении предварительного тестирования разработанного метода на тестовом множестве получено 100 % правильных результатов анализа стегоизображений, содержащих сообщения, встроенные с пороговым значением $D \ge 2$ (ошибка второго рода равна 0); для $D = 1$

эта оценка принимает значение порядка 90–95 %, а для пустых изображений количество ложных срабатываний составляет 5,4 %.

Предварительный анализ полученных результатов (табл. 1) выявил необходимость введения дополнительного ограничивающего условия для более точной оценки возможного встраивания с порогом $D = 1$.

Таблица 1

Результаты оценки ошибок первого и второго рода, %

Величина порога D	Этап 1
$D = 0$ (пустой контейнер)	e1 = 5,4
$D = 1$	e2 = 99
$D = 2$	e2 = 0
$D = 3$	e2 = 0

Примечание: e1 – ошибка первого рода, т. е. оценка отношения ложных срабатываний на пустые изображения к общему числу пустых изображений; e2 – ошибка второго рода, т. е. оценка отношения пропущенных стегоизображений как пустых контейнеров к общему числу поданных на анализ стегоизображений.

5. Повышение эффективности анализа. Случай встраивания с пороговым значением $D = 1$

После анализа гистограмм на (см. рис. 4) было предложено применить ко всему анализируемому множеству изображений $I_{D=1}$ при пороге $D = 1$ и пустых изображений I_0 следующую оценку:

$$P_{Hmax} = \frac{N_{Smax}}{N} \times 100\ \%, \tag{3}$$

где $N_{Smax} = \max[H_{STD}(s)]$ – максимум гистограммы распределения коэффициентов СКО; N – общее количество коэффициентов СКО, которое равно количеству блоков изображения $B_{8\times 8}$, переданных на анализ. Эта оценка показывает долю наиболее встречающихся коэффициентов СКО в общем количестве коэффициентов.

Из рис. 5 видно, что для заполненных контейнеров существует пороговое значение $R = 35$. При превышении этого значения можно утверждать, что изображение содержит скрытую информацию.

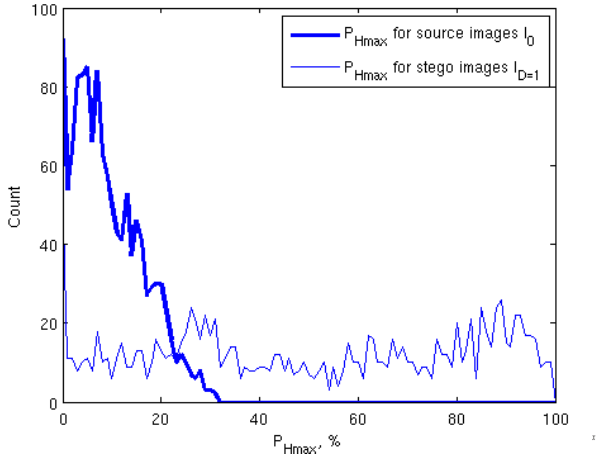


Рис. 5. Гистограммы распределения значений P_{Hmax} для множеств I_0 и $I_{D=1}$

Для минимизации влияния статистических колебаний, имеющихся в исследуемой выборке изображений, к полученным значениям функций распределения P_{Hmax} в диапазоне [0, 35] была применена операция нахождения аппроксимирующего полинома десятой степени методом наименьших квадратов (рис. 6).

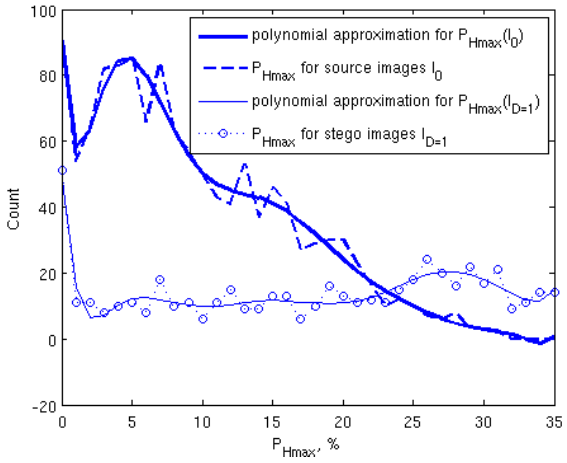


Рис. 6. Аппроксимированная часть гистограммы в диапазоне [0, 35]

При условии, что отношение P_{Hmax} находится в диапазоне [0, R], изображение содержит скрытую информацию с вероятностью, которая определяется отношением количества Count($P_{Hmax,\,D=1}$) стегоконтейнеров из тестового набора изображений с D = 1 к общему числу изображений с данным значением P_{Hmax} :

$$P_s = \frac{\text{Count}(P_{Hmax,\,D=1})}{\text{Count}(P_{Hmax,\,D=1}) + \text{Count}(P_{Hmax,\,0})}. \qquad (4)$$

Применяя формулу (4) к статистическим данным (см. рис. 6), для исследуемого изображения строится график зависимости вероятности появления скрытой информации от параметра P_{Hmax} (рис. 7).

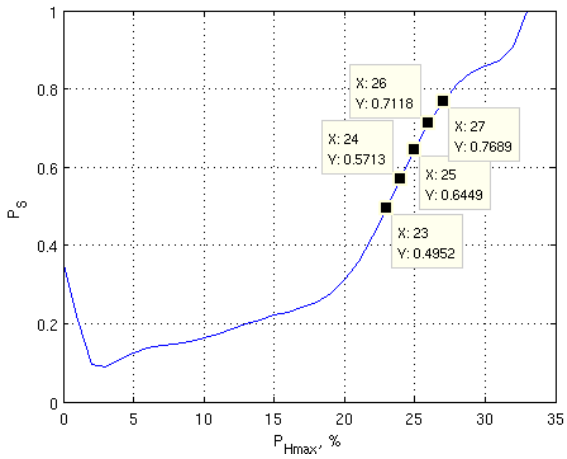


Рис. 7. График зависимости вероятности появления скрытой информации в изображении от значения P_{Hmax}

График на рис. 7 позволяет сделать следующий вывод. Изображение с вероятностью $P_S = 0{,}65$ содержит скрытое сообщение, если $P_{Hmax} = 25$ %. Чем выше величина P_{Hmax}, тем выше вероятность того, что в изображение была встроена информация.

6. Результаты

В качестве тестового набора были использованы 418 изображений с различным разрешением от 384×288 до 3089×2084 (набор I_0). Для формирования множества контейнеров, содержащих скрытые изображения, к каждому изображению применялась процедура встраивания информации методом Коха – Жао последовательности данных, полученных с генератора псевдослучайных чисел. Встраивание производилось отдельно в каждый компонент цветовой схемы. Контейнеры заполнялись на 100 % при пороговых значениях D = 1, 2, 3. Каждое из множеств состояло из 418 изображений. Эффективность различных методов стегоанализа оценивалась определением ошибок первого рода e1 и второго рода e2.

Для сравнения в табл. 2 приведены результаты оценки встраивания информации на тестовых наборах изображений методами стегоанализов OutGuess и JPHide, входящих в состав программы Stegetect [4], которые также применяются для оценки JPEG-изображений. В состав Stegdetect входят методы оценки встраивания информации JSteg, Invisible Secrets и F5. Однако результаты анализа тестовых наборов изображений для этих методов в таблицу не включены, так как их применение не выявило ни одного встраивания.

Таблица 2

Результаты сравнения эффективности анализа стегоконтейнеров, %

Порог встраивания	OutGuess	JPHide	Анализ Коха – Жао
$D = 0$	e1 = 0,2	e1 = 2,2	e1 = 5,4
$D = 1$	e2 = 99,5	e2 = 97,8	e2 = 15,6
$D = 2$	e2 = 100	e2 = 94,5	e2 = 0
$D = 3$	e2 = 100	e2 = 94,5	e2 = 0

Заключение

Предложенный критерий оценки изображений для выявления наличия встроенной информации методом Коха – Жао в JPEG-изображения дает высокий показатель (порядка 90 %) верных результатов в том случае, если встраивание выполнялось с порогом более единицы. Оценка с порогом встраивания $D = 1$ дает результат с большей ошибкой второго рода. Для пустых контейнеров ошибка первого рода примерно равна 20 %.

Таким образом, использование предложенных критериев оценки изображения в формате JPEG на предмет определения наличия скрытой информации методом Коха – Жао при определенных условиях обеспечивает эффективное решение задач стегоанализа. По сравнению с существующими методами, ориентированными на другие алгоритмы встраивания, значительно повышается достоверность анализа.

Дальнейшее повышение показателя достоверности анализа также может быть достигнуто путем выполнения автоматической классификации изображений по плотности контрастных переходов с использованием для каждого из них отдельного порогового значения.

Список литературы

1. Грибунин, В.Г. Цифровая стеганография / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. – М. : СОЛОН-Пресс, 2002. – 272 с.

2. Zhao, J. Embedding Robust Labels into Images for Copyright Protection / J. Zhao, E. Koch // Proc. of the Int. Congress on Intellectual Property Rights for Specialized Information, Knowledge and New Technologies. – Munich, Vienna, 1995. – P. 242–251.

3. Zhao, J. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling / J. Zhao, E. Koch // IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. – Greece, 1995. – P. 123–132.

4. OutGuess [Electronic resource]. – Mode of access : http://www.outguess.org. – Date of access : 11.12.10.

Поступила 10.11.11

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
Минск, П. Бровки, 6
e-mail: demidchuk.aleksey@gmail.com,
chernyavskiy@pacademy.edu.by

A.I. Demidchuk, Y.A. Chernyavskiy

AN ALGORITHM FOR DETECTING IMAGES WITH HIDDEN DATA EMBEDDED WITH KOCH – ZHAO STEGANOGRAPHIC METHOD

This paper provides a brief description of the steganographic data hiding technique suggested by Koch – Zhao. It describes the algorithm of analysis of images in JPEG format to establish the fact of hidden communication and the results of application to a test set of images. The result allows to recommend this method for primary selection of files for subsequent detailed analysis.